МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 451

П. А. ПОПОВ

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНЗИСТОРА



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1963 ЛЕНИНГРАД

На примере транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, в брошюре рассмотрены основные вольт-амперные характеристики плоскостного транзистора и методика их применения при расчете мощного транзисторного усилительного и генераторного каскада.

Брошюра предназначена для широкого круга радиолюбителей.

СОДЕРЖАНИЕ

6П2.15 *Попов Петр Александрович*

П58 **Характеристики транзистора.** М.—Л., Госэнергоиздат, 1963 24 стр. с илл (Массовая радиобиблиотека, вып. 451).

6П2.15

Редактор *В. К. Лабутин* Техн. редактор *В. В. Емжин*

Обложка художника *А. М. Кувшинникова*

Сдано в набор 23/V 1962 г. Подписано к печати 28/II 1963 г.
Т-08582 Бумага 84×108 1/32 1,23 п. л. Уч.-изд. л. 1,7
Тираж 110 000 экз. Цена 07 коп. Заказ 2358

Типография № 1 Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ О ХАРАКТЕРИСТИКАХ ТРАНЗИСТОРА

Основным элементом конструкции плоскостного транзистора является пластинка из германия или кремния, три слоя (объема) которой имеют различный тип проводимости. Эти объемы носят названия «эмиттер», «база» и «коллектор». Каждый из них имеет индивидуальный вывод, проходящий через герметически закрытый корпус транзистора. С помощью этих выводов транзистор включают в электрическую цепь.

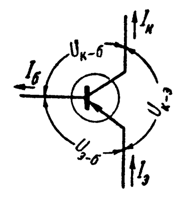


Рис. 1 Напряжения и токи в цепях выводов транзистора.

После включения транзистора в цепь и подключения источников питания в каждом из выводов появляется некоторый ток, а между каждыми двумя выводами — некоторое напряжение (рис. 1).

Ток в выводе эмиттера называют током эмиттера и обозначают символом $I_э$, ток в выводе базы — током базы $I_б$, ток в выводе коллектора — током коллектора $I_к$. Напряжение между выводами коллектора и эмиттера обозначают символом $U_{к-э}$, между выводами базы и эмиттера — символом $U_{б-э}$, между выводами коллектора и базы—символом $U_{к-б}$. Каждая из шести названных величин связана со всеми остальными вполне определенными зависимостями.

Наличие зависимости одной величины (y) от некоторой другой величины (x) принято показывать с помощью такой короткой записи:

$$y = f(x)$$

(величина y является функцией величины x).

Характер зависимости одной величины от другой можно представить с помощью таблицы, формулы или графика. Табличный способ выражения зависимости мало нагляден и не всегда удобен для расчета. Выражение зависимости с помощью формулы (аналитический способ) только в том случае представляет практический интерес, если формула получается достаточно простой. Это бывает далеко не всегда. Графический способ выражения зависимости часто оказывается наиболее удобным и наглядным.

Графики зависимостей между напряжениями и токами в выводах электродов транзистора называются **характеристиками** транзистора.

В любой схеме усилительного каскада два электрода транзистора обязательно входят в состав входной цепи каскада, а два электрода — в состав выходной цепи. Так как транзистор имеет всего три электрода, то один из них оказывается общим для входной и выходной цепи. Поэтому схему включения транзистора можно условно изобразить так, как показано на рис. 2, где транзистор обозначен буквой T. Ток во входной цепи транзистора и напряжение между электродами входной цепи обозначены соответственно через I_1 и U_1, ток и напряжение между электродами выходной цепи — через I_2 и U_2.

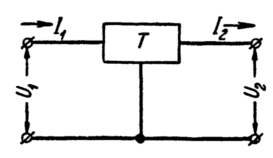


Рис. 2. Обобщенная схема включения транзистора

Наибольший интерес представляют следующие зависимости, которые существуют между четырьмя названными величинами.

1) зависимость величины входного тока I_1 от величины входного напряжения U_1 (входная характеристика транзистора)

$$I_1 = f_1(U_1);$$

2) зависимость тока I_2 от напряжения U_2 (выходная характеристика транзистора)

$$I_2 = f_2(U_2);$$

3) зависимость одной из величин I_2 или U_2 в выходной цепи от одной из величин I_1 или U_1 во входной цепи (характеристика прямой передачи), например характеристика прямой передачи по току

$$I_2 = f_3(I_1)$$

(слова «прямой передачи» в названии характеристики означают, что эта характеристика отражает процесс передачи энергии в «прямом», т. е. в обычном для усилительного каскада направлении — от входных зажимов к выходным);

4) зависимость одной из величин I_1 или U_1 во входной цепи от одной из величин I_2 или U_2 в выходной цепи (характеристика обратной передачи), например характеристика обратной передачи по напряжению

$$U_1 = f_4(U_2)$$

(слова «обратной передачи» в названии характеристики указывают на то обстоятельство, что характеристика отражает процесс передачи энергии в «обратном» для усилительного каскада направлении — от выходных зажимов ко входным).

Для того чтобы подчеркнуть различный характер зависимостей и соответственно различный внешний вид названных характеристик, мы применяли для обозначения функциональной зависимости букву f с разными индексами.

В свою очередь форма каждой из характеристик зависит от того, какой электрод является общим для входной и выходной цепей транзистора. Поэтому различают характеристики транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, характеристики транзистора, включенного по схеме с общей базой, и характеристики транзистора, включенного по схеме с общим коллектором.

Прежде чем перейти к рассмотрению самих характеристик,

условимся о том, как будем обозначать на схемах и графиках направления токов и полярность напряжений.

Во избежание недоразумений следует помнить, что символами $I_к$, $I_б$, $I_э$, $U_{к-э}$, $U_{к-б}$, $U_{э-б}$, I_1, U_1, I_2, U_2 на протяжении всей брошюры мы обозначаем не переменные составляющие токов и напряжений, а величины постоянных токов и напряжений между электродами транзистора.

Ток эмиттера, коллектора или базы считаем положительным, если его фактическое направление совпадает с направлением соответствующей стрелки на рис 1 Этот же ток считаем отрицательным, если его фактическое направление противоположно направлению стрелки. Поэтому, например, равенство

$$I_б = -0{,}5\ ма$$

или, что то же самое,

$$-I_б = 0{,}5\ ма$$

означает, что ток базы $I_б$ численно равен 0,5 *ма* и идет в данном случае не от транзистора, а к транзистору, т. е. в направлении, обратном показанному стрелкой на рис. 1.

Напряжения между выводами электродов транзистора будем обозначать символом U с двумя буквами в индексе. Буквы, стоящие в индексе, являются первыми буквами названий тех электродов, между которыми приложено данное напряжение.

Если один из электродов является общим, то соответствующая буква помещается в индексе на второе место Знак (плюс или минус) перед численным значением напряжения выбираем таким образом, чтобы полученная с учетом знака величина выражала потенциал первого (по месту буквы в индексе) электрода по отношению к потенциалу второго электрода. Например, выражение $U_{к-б} = -2\ в$ означает, что коллектор находится под отрицательным по отношению к базе потенциалом. Этот же факт можно выразить и так: $U_{б-к} = 2\ в$ (база находится под положительным по отношению к коллектору потенциалом). Рассматривая схему с общей базой, следует применять первое выражение, а рассматривая схему с общим коллектором — второе. В случае схемы с общим эмиттером можно применить как первое, так и второе выражение

ВЫХОДНЫЕ СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Выходные статические характеристики транзистора, как и все остальные характеристики, мы достаточно подробно рассмотрим для случая включения транзистора по схеме с общим эмиттером (рис. 3).

Полярность источников питания на рис. 3 и в дальнейшем соответствует транзистору структуры *р-п-р*.

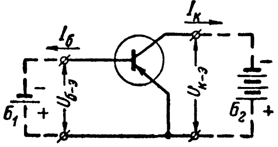


Рис. 3. Включение транзистора по схеме с общим эмиттером.

Сравнивая этот рисунок с рис. 2 и вспоминая определение выходной характеристики, приходим к выводу, что выходной характеристикой транзистора в данном случае является график зависимости тока $I_к$ в цепи коллектора от величины напряжения $U_{к-э}$ между вы-

водами коллектора и эмиттера Но вид этого графика в значительной степени зависит от режима питания входной цепи. Можно было бы снимать характеристику, поддерживая неизменной величину напряжения $U_{б-э}$ между выводами входных электродов транзистора Однако гораздо чаще выходную характеристику снимают, поддерживая неизменным значение тока базы $I_б$.

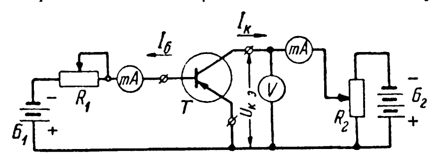


Рис 4 Схема для снятия выходных статических характеристик транзистора по точкам

Для снятия характеристики собирают схему, показанную на рис. 4, где T—исследуемый транзистор Установив с помощью переменного сопротивления R_1 определенное значение тока базы $I_б = I_{б1}$, устанавливают с помощью потенциометра R_2 ряд последовательных значений напряжения $U_{к-э}$ (в заданных или выбранных самостоятельно пределах) и записывают каждый раз величину тока коллектора $I_к$, одновременно следя за тем, чтобы ток $I_б$ оставался неизменным при изменениях напряжения $U_{к-э}$

График снятой таким образом зависимости

$$I_к = f(U_{к\ э}) \text{ при } I_б = I_{б1}$$

(т е при некотором постоянном значении тока базы) называется выходной статической характеристикой транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером

Несколько характеристик, снятых при различных значениях тока базы ($I_{б1}$, $I_{б2}$ и т д) и начерченных на общей координатной сетке, образуют семейство статических выходных характеристик Статическими эти характеристики называются потому, что каждая из них снимается при неизменном режиме входной цепи по току (в «статических» условиях) Снятое таким образом семейство выходных статических характеристик транзистора типа П13 показано на рис 5

Ток базы (величина, которая остается неизменной при снятии каждой характеристики семейства) называется параметром характеристики Это, по сути дела, математическое понятие параметра характеристики не следует смешивать с разнообразными электрическими параметрами самого транзистора, например с так называемыми «малосигнальными»

Напомним, что малосигнальными параметрами транзистора называются коэффициенты в таких системах уравнений, которые выражают связь между малыми амплитудами переменных составляющих токов и напряжений во входной и выходной цепях транзистора Так, в системе уравнений

$$U_{1m} = h_{11}I_{1m} + h_{12}U_{2m};$$
$$I_{2m} = h_{21}I_{1m} + h_{22}U_{2m}$$

коэффициенты h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22} являются упомянутыми малосигнальными параметрами транзистора, а символами I_{1m}, U_{1m}, I_{2m} и U_{2m} обозначены амплитуды переменных составляющих токов и напряжений во входной и выходной цепях соответственно

У читателя может возникнуть вопрос почему при снятии семейства выходных характеристик транзистора в качестве параметра берут величину входного тока, а не величину входного напряжения, как это делается, например, при снятии семейства анодных характеристик электронной лампы?

Здесь уместно вспомнить, что в основе работы электронной лампы лежит принцип управления потоком электронов с помощью электрического поля, зависящего от потенциала управляющей сетки, т е. от входного напряжения Поэтому семейство анодных характеристик

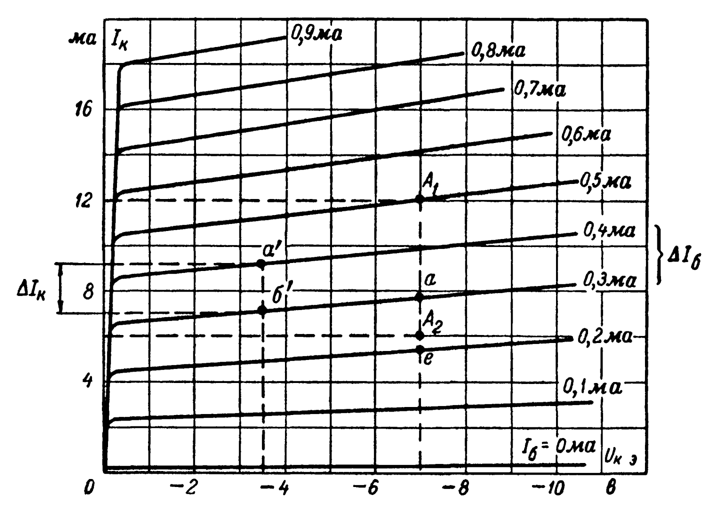


Рис. 5 Семейство выходных статических характеристик транзистора типа П13, включенного по схеме с общим эмиттером.

лампы, у которых параметром служит напряжение управляющей сетки, хорошо отражает свойства электронной лампы и является весьма удобным при расчете лампового усилительного каскада

В основе действия транзистора лежит иное явление — диффузия носителей электрического заряда от эмиттера к коллектору При этом поток носителей, создаваемый эмиттером и почти полностью достигающий коллектора, может резко изменяться при небольших изменениях входного напряжения и температуры транзистора, ибо имеют место экспоненциальные зависимости тока от напряжения и температуры Эти обстоятельства осложняют снятие выходных характеристик транзистора при постоянном входном напряжении и вызывают значительное увеличение погрешности при небольших ошибках в установке заданного значения входного напряжения. Поэтому на практике чаще выбирают в качестве параметра выходных характеристик транзистора входной ток.

Рассматривая рис 5, можно обнаружить следующие особенности семейства выходных характеристик

1 На каждой из характеристик есть почти прямолинейный участок, имеющий сравнительно небольшой наклон к оси напряжений.

В пределах этого участка изменения напряжения $U_{к-э}$ мало влияют на величину тока коллектора $I_к$.

2 Для того чтобы изменить величину тока коллектора при неизменном значении напряжения $U_{к-э}$ в области упомянутого участка с небольшим наклоном, необходимо изменить ток базы $I_б$

3 Приращения тока коллектора $\Delta I_к$ (при неизменном напряжении $U_{к-э}$) значительно превышают вызывающие их приращения тока базы $\Delta I_б$.

Транзистор как бы осуществляет усиление входного тока $I_б$. Этот процесс можно объяснить проще приложив к выводам базы и эмиттера некоторое напряжение, мы создаем ток $I_э$ в цепи эмиттера Основная часть этого тока благодаря диффузии носителей электрического заряда (электронов или дырок) поступает в цепь коллектора и лишь незначительная часть ответвляется в цепь базы. Внешне, при сравнении приращений токов базы и коллектора, это выглядит как усилие входного тока

Отношение $\Delta I_к/\Delta I_б$, вычисленное для достаточно малого по сравнению с величиной $I_б$ приращения $\Delta I_б$, приблизительно равно величине параметра h_{21}, измеренного для случая включения транзистора по схеме с общим эмиттером, или, что то же самое, величине коэффициента усиления транзистора по току β в схеме с общим эмиттером в режиме короткого замыкания выходных зажимов транзистора по переменной составляющей:

$$\frac{\Delta I_к}{\Delta I_б} \approx h_{21} = \beta. \qquad (1)$$

Приближенное равенство (1) будет тем точнее, чем меньше выбрана величина $\Delta I_б$.

Условие о режиме короткого замыкания означает, что изменение тока базы и, следовательно, тока коллектора не должно приводить к изменению величины напряжения $U_{к-э}$, действующего между выходными зажимами транзистора

Величина коэффициента усиления транзистора по току зависит у каждого образца транзистора от выбранного рабочего режима от величины напряжения $U_{к-э}$ и тока $I_к$ или $I_б$.

Два способа определения величины β по семейству выходных статических характеристик рассмотрены в следующем примере.

Пример 1. По изображенному на рис. 5 семейству выходных статических характеристик транзистора типа П13 определить коэффициент усиления транзистора по току β при напряжении $U_{к-э} = -3{,}5$ *в* и токе $I_б = 0{,}35$ *ма*

Решение. *Первый способ.* Восстанавливаем перпендикуляр к оси напряжений в точке $U_{к-э} = -3{,}5$ *в* и находим точки его пересечения с характеристиками, соответствующими току базы $I_б = 0{,}3$ *ма* и $I_б = 0{,}4$ *ма*. Из точек пересечения (*а′* и *б′* на рис. 5) в свою очередь опускаем перпендикуляры на ось токов и определяем приращение $\Delta I_к$ тока коллектора, вызванное приращением тока базы $\Delta I_б = 0{,}1$ *ма*.

В соответствии с равенством (1)

$$\beta = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_б} = \frac{9{,}2\cdot 10^{-3} - 7\cdot 10^{-3}}{0{,}1\cdot 10^{-3}} = 22.$$

Второй способ Восстановив перпендикуляр к оси напряжений в точке $U_{к-э} = -3{,}5$ *в*, фиксируем с помощью циркуля-измерителя

величину отрезка $a'б'$ перпендикуляра и, совместив одну из ножек циркуля с началом координат, а другую — с осью токов, непосредственно по оси токов отсчитываем величину $\Delta I_к$ приращения тока коллектора и подставляем ее в формулу (1).

4 Если напряжение $U_{к-э}$ уменьшить по абсолютной величине до некоторого предела, то при дальнейшем его уменьшении ток коллектора начнет резко уменьшаться — транзистор переходит в режим насыщения.

В зависимости от типа транзистора и величины тока базы насыщение наступает при напряжении $U_{к-э}$ от —0,2 до —1,5 *в*.

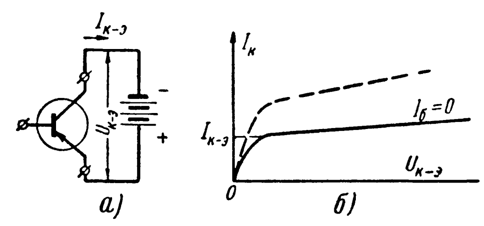


Рис. 6. Схема измерения (*а*) и график (*б*) тока $I_{к-э}$.

В частности, из рис 5 следует, что у данного экземпляра транзистора типа П13 при токе базы $I_б=0{,}9$ *ма* насыщение наступает при напряжении $U_{к-э}=-0{,}4$ *в*

5. При токе базы, равном нулю, например при разомкнутой цепи базы, в цепи батарея—эмиттер—коллектор существует некоторый ток. Это так называемый начальный ток коллектора при отключенной базе (рис. 6,*а*). В литературе этот ток обозначают по-разному. Мы примем для него обозначение $I_{к-э}$. Ток $I_{к-э}$ у германиевых транзисторов малой мощности может составлять от нескольких десятков до нескольких сотен микроампер, а у мощных транзисторов — до нескольких миллиампер. У кремниевых транзисторов величина этого тока в сотни раз меньше, чем у германиевых.

Величина тока $I_{к-э}$ у разных транзисторов одного и того же типа различна, а у каждого транзистора зависит от величины напряжения, приложенного к выводам коллектора и эмиттера. Характер этой зависимости показан на рис 6,*б*.

При повышении температуры график зависимости $I_{к-э}=f(U_{к-э})$ принимает вид, показанный на рис. 6,*б* пунктиром. увеличивается отрезок $I'_{к-э}$, отсекаемый на оси токов продолжением прямолинейного участка характеристики, и одновременно увеличивается угол наклона прямолинейного участка Можно считать, что при повышении температуры на каждые 10° С величина тока $I'_{к-э}$ удваивается.

РАБОЧАЯ ТОЧКА ТРАНЗИСТОРА

Рассмотрим работу транзисторного каскада усиления низкой частоты, схема которого показана на рис. 7.

В состоянии покоя, когда усиливаемое переменное напряжение на входе каскада отсутствует, в цепи коллектора протекает неко-

торый ток покоя I_A, а между выводами коллектора и эмиттера существует некоторое напряжение покоя U_A Такое электрическое состояние (режим) транзистора можно изобразить на семействе выходных статических характеристик точкой Эта точка должна лежать на пересечении перпендикуляра, восстановленного к оси напряжений при $U_{к-э}=U_A$ с перпендикуляром, восстановленным к оси токов при $I_к=I_A$ (см., например, точку A_1 на рис 5, характеризующую режим покоя $U_A=-7$ *в* и $I_A=12$ *ма*). Найденная таким образом точка называется начальной рабочей точкой или точкой покоя транзистора

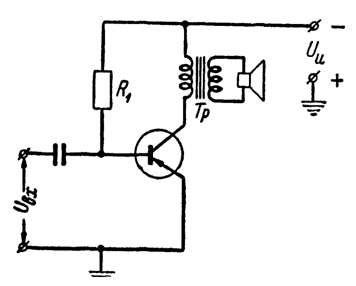


Рис. 7. Усилительный каскад на транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером.

Как получить требуемую величину тока в цепи коллектора?

Мы уже знаем, что для создания в цепи коллектора некоторого тока необходимо при заданном напряжении $U_{к-э}$ создать вполне определенный ток в цепи базы Именно для этой цели служит в схеме каскада сопротивление R_1

Как увидим далее, напряжение между выводами базы и эмиттера при работе транзистора в режиме усиления составляет десятые доли вольта Поэтому можно считать, что напряжение источника питания $U_и$ полностью приложено к выводам сопротивления R_1 и создает в последнем ток

$$I_б = \frac{U_и}{R_1}.$$

При заданном напряжении источника $U_и$ ток базы и, следовательно, ток покоя транзистора зависят от величины сопротивления R_1

Определить необходимую величину этого сопротивления можно как с помощью семейства выходных статических характеристик, так и чисто экспериментальным путем

В первом случае определяем, какому току базы $I_б$ соответствует та выходная статическая характеристика, на которой лежит точка покоя, и находим величину сопротивления R_1 по формуле

$$R_1 = \frac{U_и}{I_б}.$$

Пример 2 Определить величину сопротивления R_1 в схеме усилительного каскада на рис 7, если $U_и=8$ *в*, $U_A=-7$ *в*, $I_A=12$ *ма*, а семейство выходных статических характеристик транзистора изображено на рис 5

Решение. Восстановив перпендикуляры к осям координат при $U_{к-э}=-7$ *в* и $I_к=12$ *ма*, находим, что точка их пересечения A_1 лежит на выходной характеристике, соответствующей току базы $I_б=0{,}5$ *ма* При этом

$$R_1 = \frac{U_и}{I_б} = \frac{8}{0{,}5\cdot 10^{-3}} = 16\,000 \text{ ом, т. е } 16 \text{ ком.}$$

Иногда выбранная рабочая точка попадает в промежуток между имеющимися характеристиками семейства, и при расчете приходится прибегать к интерполяции, как это сделано в следующем примере

Пример 3. Решить предыдущую задачу, приняв $I_A=6$ *ма*

Решение. Определив положение рабочей точки (точка A_2 на рис 5), убеждаемся, что она лежит в промежутке между характеристиками, снятыми при токах базы $I_б=0{,}2$ *ма* и $I_б=0{,}3$ *ма*. Более точно величину тока базы, соответствующего току коллектора $I_к=6$ *ма*, можно найти так

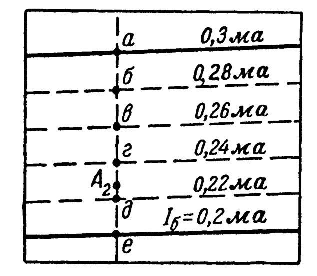


Рис. 8. Построение характеристик с помощью интерполяции

Отрезок перпендикуляра к оси напряжений, заключенный между двумя упомянутыми характеристиками, делим на пять равных частей. Этот участок чертежа на рис 5 показан в увеличенном виде на рис 8

С достаточной для практики точностью можно считать, что при изменении тока базы от 0,2 до 0,3 *ма* равным приращениям тока базы соответствуют равные приращения тока коллектора Иными словами, можно считать, что в пределах указанного участка между величинами $I_к$ и $I_б$ существует прямая пропорциональность и что характеристики $I_к=f(U_{к-э})$ при $I_б=0{,}22$ *ма*, 0,24 *ма*, 0,26 *ма*, 0,28 *ма* занимают положение, указанное на рис 8 пунктиром. Теперь ясно что каждую из точек *б*, *в*, *г* и *д* на отрезке *а е* можно рассматривать как точку пересечения перпендикуляра к оси напряжений с соответствующей статической характеристикой

Ясно также, что точка A_2 должна лежать на характеристике, соответствующей току базы 0,227 *ма*

Отсюда

$$R_1=\frac{U_и}{I_б}=\frac{8}{0{,}227\ 10^{-3}}=35\,300\ ом,\ т\ е\ \ 35{,}3\ ком$$

Заметим, что при наличии некоторого навыка деление отрезка перпендикуляра на равные части можно выполнять мысленно.

При экспериментальном определении величины сопротивления R_1 необходимо в разрыв цепи коллектора включить миллиамперметр, а между выводом базы транзистора и отрицательным полюсом батареи — переменное сопротивление. Постепенно уменьшая величину последнего, устанавливают в цепи коллектора требуемый ток. Затем следует измерить с помощью омметра величину включенной части переменного сопротивления и заменить его близким по значению постоянным.

Задача облегчается, если известна величина коэффициента усиления транзистора по току в схеме с общим эмиттером β. Это дает возможность определить ориентировочно величину сопротивления R_1 по формуле

$$R_1=\beta\frac{U_и}{I_A}.$$

ЛИНИЯ НАГРУЗКИ

При подаче на входные зажимы усилительного каскада (рис. 7) переменного напряжения ток в цепи базы начнет изменяться в одну и другую сторону от своего первоначального значения. Это в свою очередь вызовет изменение тока коллектора.

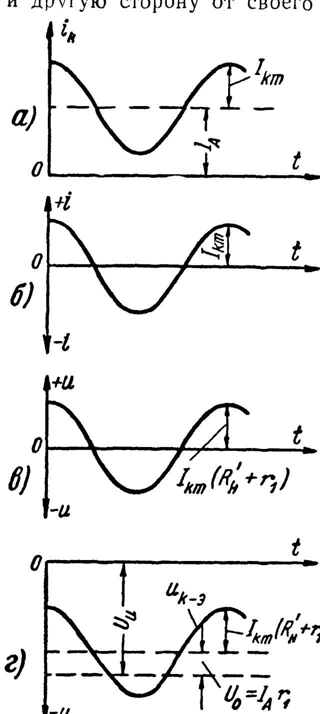


Рис. 9. График временных зависимостей токов и напряжений в цепях транзисторного каскада.

а — результирующий ток в цепи коллектора при синусоидальной переменной составляющей тока базы; *б* — переменная составляющая коллекторного тока, *в* — переменная составляющая падения напряжения на зажимах обмотки трансформатора; *г* — напряжение между выводами коллектора и эмиттера транзистора.

Если сопротивление нагрузки в цепи коллектора отсутствует, то изменения коллекторного тока не приведут к изменениям напряжения $U_{к-э}$ и рабочая точка на семействе характеристик будет перемещаться по прямой, перпендикулярной к оси напряжений.

Иную картину наблюдаем, когда в цепь коллектора включено сопротивление нагрузки (в нашем случае—сопротивление звуковой катушки громкоговорителя $R'_н$, пересчитанное к первичной обмотке трансформатора *Тр*).

Если переменная составляющая тока базы изменяется, например, по синусоидальному закону, то коллекторный ток (рис. 9,*а*) можно рассматривать как сумму постоянного тока I_A, показанного на рис. 9,*а* штриховой линией, и переменного тока $I_{кm}$, отдельно показанного на рис. 9,*б*.

Переменная составляющая тока коллектора создает на зажимах первичной обмотки трансформатора падение напряжения, пропорциональное сумме $R'_н+r_1$, где r_1— сопротивление провода первичной обмотки.

График этого напряжения изображен на рис. 9,*в*.

Напряжение $u_{к-э}$ между выводами эмитера и коллектора в любой момент времени должно быть равно алгебраической сумме мгновенного значения переменной составляющей напряжения *u* на первичной обмотке трансформатора, постоянной составляющей падения напряжения на сопротивлении провода первичной обмотки трансформатора $U_0=I_A r_1$ и напряжения батареи $U_и$. Сумма этих грех напряжений показана с учетом знаков на рис. 9,*г*.

Сравнивая рис. 9,*а* и *г*, приходим к выводу, что при увеличении тока коллектора $i_к$ абсолютная величина напряжения $u_{к-э}$ уменьшается, а при уменьшении тока — увеличивается. В результате рабочая точка транзистора при изменениях тока $i_к$ будет перемещать-

ся на графике семейства выходных статических характеристик по прямой, которая образует некоторый угол с осью напряжений (прямая *1—2* на рис. 10). Угол наклона прямой зависит от величины сопротивления нагрузки транзистора.

Эта прямая называется линией нагрузки или динамической выходной характеристикой каскада. Динамической эта линия называется потому, что она отражает зависимость, существующую между током коллектора $I_к$ и напряжением коллектор — эмиттер $U_{к-э}$ при наличии переменной составляющей тока во входной цепи, т. е. в динамическом режиме.

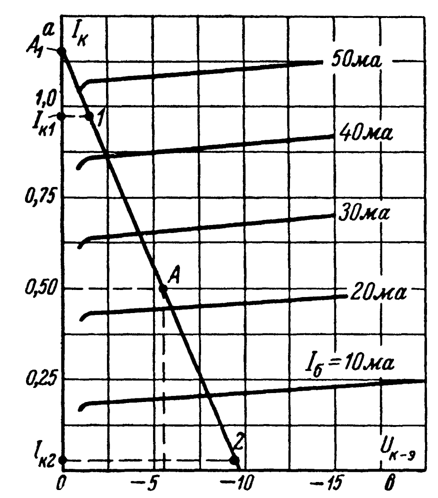


Рис. 10. Семейство выходных статических характеристик транзистора типа П201, включенного по схеме с общим эмиттером.

Динамическая характеристика играет важную роль при расчете мощного транзисторного каскада, в цепях которого амплитуды переменных составляющих токов и напряжений соизмеримы с величинами постоянных составляющих токов и напряжений. Рассмотрим в качестве иллюстрации пример расчета мощного усилительного каскада, работающего в режиме класса А.

Пример 4. Рассчитать выходной каскад на транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером (рис. 7), если заданы: выходная мощность P_2=0,75 *вт*, напряжение батареи $U_и$=6 *в*, сопротивление нагрузки $R_н$=2 *ом*.

Решение. 1. Примем ориентировочно величину падения напряжения на сопротивлении первичной обмотки трансформатора U_0=0,5 *в*. При этом напряжение между выводами коллектора и эмиттера в состоянии покоя

$$U_A = U_и - U_0 = 6 - 0,5 = 5,5 \text{ в}.$$

2. Определим максимально допустимую амплитуду напряжения $U_{тр\,m}$ на зажимах первичной обмотки трансформатора с учетом того, что для предотвращения нелинейных искажений напряжение $U_{к-э}$ не должно в процессе работы каскада падать ниже 1,5 *в*:

$$U_{трm} = U_A - 1,5 \text{ в} = 5,5 - 1,5 = 4 \text{ в}.$$

3. Определим необходимую для получения заданной мощности P_2 амплитуду $I_{кm}$ переменной составляющей тока в цепи коллектора, считая к. п. д. трансформатора $\eta_{тр}$ равным 0,8:

$$I_{кm} = \frac{2P_2}{\eta_{тр}U_{трm}} = \frac{2\cdot 0,75}{0,8\cdot 4} = 0,47 \text{ а}.$$

4 Для неискаженного воспроизведения формы усиливаемого тока необходимо, чтобы ток покоя коллектора I_A был несколько больше максимальной амплитуды переменной составляющей $I_{\text{к}m}$. Выберем $I_A=0{,}5$ *а*.

5 Определим мощность P_A, рассеиваемую на коллекторном переходе в состоянии покоя:

$$P_A = U_A I_A = 5{,}5\ 0{,}5 = 2{,}75\ \textit{вт}$$

Исходя из величины P_A, выберем транзистор типа П201, для которого наибольшая мощность, рассеиваемая с дополнительным внешним радиатором, достигает 10 *вт*

Семейство выходных статических характеристик транзистора типа П201 показано на рис. 10

6. Определим необходимую величину сопротивления нагрузки транзистора (пересчитанное к первичной обмотке трансформатора сопротивление нагрузки).

$$R'_{\text{н}} = \frac{U_{\text{тр}m}}{I_{\text{к}m}} = \frac{4}{0{,}47} = 8{,}5\ \textit{ом}$$

7 Необходимый коэффициент трансформации выходного трансформатора (с учетом к. п. д трансформатора) найдем как

$$n = \frac{w_1}{w_2} = \sqrt{\frac{\eta_{\text{тр}} R'_{\text{н}}}{R_{\text{н}}}} = \sqrt{\frac{0{,}8 \cdot 8{,}5}{2}} = 1{,}84.$$

8. На графике семейства выходных статических характеристик транзистора (рис. 10) строим динамическую выходную характеристику. Для этого:

а) наносим на график начальное положение рабочей точки (точки покоя) A;

б) строим вспомогательную точку A_1, для чего на оси токов от точки $I_{\text{к}}=I_A$ откладываем в положительном направлении оси (с соблюдением масштаба) величину

$$I' = \frac{U_A}{R'_{\text{н}}} = \frac{5{,}5}{8{,}5} = 0{,}65\ a;$$

в) через точки A_1 и A проводим прямую до пересечения с осью напряжений; это и будет нагрузочная прямая каскада.

9. В точке пересечения линией нагрузки оси напряжений читаем максимальное возможное напряжение на коллекторе — 9,8 *в*. Проверяем, что оно ниже предельно допустимого (—22 *в*) для выбранного типа транзистора (П201).

10. Наносим на оси токов точку $I_{\text{к}1}$ при

$$I_{\text{к}} = I_A + I_{\text{к}m} = 0{,}5 + 0{,}47 = 0{,}97\ a$$

и точку $I_{\text{к}2}$ при

$$I_{\text{к}} = I_A - I_{\text{к}m} = 0{,}5 - 0{,}47 = 0{,}03\ a.$$

Через эти точки проводим прямые, параллельные оси напряжений, до пересечения с нагрузочной прямой. Точки пересечения обозначим цифрами *1* и *2*.

11. Определяем, каким токам базы соответствуют статические выходные характеристики, пересекающиеся с нагрузочной прямой в точках *1* и *2*. Если одна из этих точек или обе они попали в промежуток между характеристиками, имеющимися на графике семейства, то следует прибегнуть к интерполяций, как это было сделано в примере 3.

В рассматриваемом случае точка *1* должна лежать на статической характеристике, снятой при токе базы $I_{б1}=46$ *ма*, а точка *2* — на характеристике, соответствующеи току базы $I_{б2}=1$ *ма*.

12. Амплитуду входного тока определяем по формуле

$$I_{1m}=\frac{I_{б1}-I_{б2}}{2}=\frac{46-1}{2}=22{,}5\ ма.$$

Продолжение расчета см в примере 5

СТАТИЧЕСКИЕ ВХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Статической входной характеристикой транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, называется график зависимости тока базы $I_б$ от напряжения база — эмиттер $U_{б-э}$ при постоянном значении напряжения коллектор — эмиттер $U_{к-э}$.

В качестве примера на рис 11 показаны входные статические характеристики транзистора типа П13, снятые при напряжении $U_{к-э}=-1{,}4$ *в* и 0 *в*. Несколько характеристик, снятых при разных значениях напряжения $U_{к-э}$, образуют семейство входных статических характеристик. Эти характеристики называются статическими потому, что каждая из них снимается при неизменном значении напряжения $U_{к-э}$ (в статических условиях). Напряжение $U_{к-э}$ является параметром семейства характеристик.

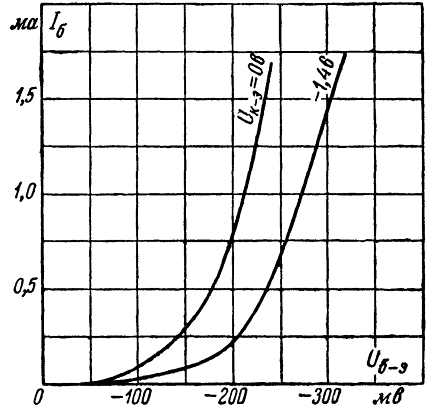
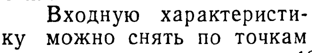


Рис. 11. Входные статические характеристики транзистора типа П13, включенного по схеме с общим эмиттером.


Входную характеристику можно снять по точкам с помощью схемы на рис. 12 Установив потенциометром R_2 требуемое напряжение $U_{к-э}$ и поддерживая его в дальнейшем неизменным, меняют с помощью переменного сопротивления R_1 величину входного напряжения $U_{б-э}$ и записывают каждый раз величину входного тока $I_б$. Снятие характеристики целесообразно осуществлять при сравнительно небольшом напряжении $U_{к-э}$, чтобы не вызвать значительного разогрева переходов.

На величине входного сопротивления транзистора и, следовательно, на форме его входной характеристики сильнейшим образом

сказывается влияние температуры эмиттерного перехода. Снимая входные характеристики по точкам при разных значениях напряжения $U_{к-э}$, легко впасть в ошибку, потому что в процессе снятия каждой характеристики мощность, подводимая к транзистору, и степень нагрева транзистора будут изменяться ступенями. В лабораторных условиях входные характеристики снимают импульсным методом, при котором температура переходов транзистора остается в процессе снятия характеристики практически постоянной.

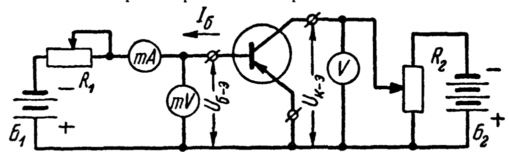


Рис. 12. Схема для снятия статических входных характеристик транзистора по точкам.

Анализ входных характеристик, снятых импульсным методом, показывает, что при повышении напряжения $U_{к-э}$ характеристики смещаются вправо. Но смещение это при напряжениях $U_{к-э}$, превышающих 0,5—1 *в*, столь незначительно, что его можно не учитывать. Поэтому в справочниках обычно приводят всего лишь две статические входные характеристики: для $U_{к-э}=0$ и для напряжения $U_{к-э}$ порядка нескольких вольт. При расчете усилительного каскада следует применять вторую характеристику.

Отметим некоторые особенности статических входных характеристик транзистора:

1. Входной ток связан с величиной входного напряжения экспоненциальной зависимостью:

$$I_б = Ae^{-BU_{б-э}},$$

где A и B — некоторые постоянные коэффициенты.

В связи с этим при увеличении напряжения $U_{б-э}$ ток $I_б$ резко возрастает.

2. Ток $I_б$ достигает нормальных рабочих значений уже при напряжениях $U_{б-э}$ порядка нескольких десятых долей вольта.

ВХОДНАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Электрический режим входной цепи каскада (величину напряжения $U_{б-э}$ и тока $I_б$) можно изобразить в виде точки на графике семейства входных статических характеристик. Такая точка называется рабочей.

Если сопротивление нагрузки в цепи коллектора отсутствует, то изменения входного напряжения хотя и вызывают изменения выходного тока, но не приводят к изменениям напряжения $U_{к-э}$, и рабочая точка перемещается по соответствующей статической входной характеристике.

Если же сопротивление нагрузки в цепи коллектора не равно нулю, то при изменениях входного напряжения будет изменяться и напряжение $U_{к-э}$. Поэтому рабочая точка на семействе входных

характеристик будет перемещаться с одной характеристики на другую, описывая при этом путь, называемый **динамической** входной характеристикой

Но учитывая, что входные статические характеристики, снятые при разных значениях напряжения $U_{к-э}$, мало отличаются друг от друга, обычно вполне допустимо рассматривать имеющуюся входную статическую характеристику как динамическую.

Пример 5. Определить величину мощности P_1, подводимой ко входу усилительного каскада, рассчитанного в примере 4.

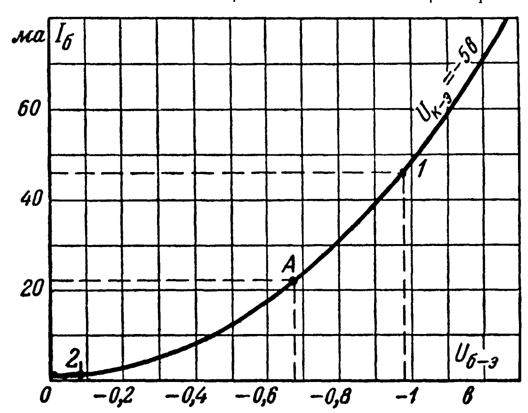


Рис. 13. Входная статическая характеристика транзистора типа П201.

Решение 1. На статическую входную характеристику транзистора П201 (рис. 13) наносим в соответствии с данными предыдущего расчета и рис. 10 исходное положение *А* рабочей точки при $I_б = I_{б A} = 22{,}5$ *ма*, а также точки *1* при $I_{б1} = 46$ *ма* и *2* при $I_{б2} = 1$ *ма*.

Строго говоря, точку *А* следовало бы нанести на статическую входную характеристику, снятую при напряжении $U_{к-э} = -5{,}5$ *в*, точку *1* — на характеристику, снятую при напряжении $U_{к-э} = -1{,}5$ *в*, а точку *2* — на характеристику, снятую при $U_{к-э} = -9{,}5$ *в*. Но мы считаем, что все эти характеристики практически совпадают с характеристикой, снятой при напряжении $U_{к-э} = -5$ *в*.

2. Определяем соответствующие точкам *1* и *2* значения входного напряжения: $U_{б-э1} = 0{,}98$ *в*; $U_{б-э2} = -0{,}09$ *в*.

3. Рассматривая разности $(I_{б1} - I_{б2})$ и $(U_{б-э1} - U_{б-э2})$ как удвоенные значения амплитуд входного тока I_{1m} и входного напряжения U_{m1}, определим величину необходимой для возбуждения каскада входной мощности:

$$P_1 = \frac{I_{1m} U_{1m}}{2} = \left| \frac{(I_{б1} - I_{б2})(U_{б\text{-}э1} - U_{б\text{-}э2})}{8} \right| =$$

$$= \left| \frac{(46 - 1) \cdot 10^{-3} [(-0{,}98) - (-0{,}09)]}{8} \right| = 5 \cdot 10^{-3} \text{ вт, т. е. } 5 \text{ мвт}.$$

Отношение найденной по динамической входной характеристике амплитуды входного напряжения к амплитуде входного тока называют «средним» входным сопротивлением $R_{вх.с}$ транзистора.

Наряду с понятием о среднем входном сопротивлении транзистора существует понятие о входном сопротивлении транзистора постоянному току $R_{вх0}$. Последнее определяют как отношение напряжения между входными электродами транзистора к току во входной цепи.

Очевидно, величина $R_{вх0}$ зависит от выбранной рабочей точки, а $R_{вх.с}$ — от рабочей точки и амплитуды входного тока или напряжения.

Пример 6. Определить значения $R_{вх.с}$ и $R_{вх0}$ транзистора типа П20 по данным предыдущего примера.

Решение. 1. Среднее входное сопротивление

$$R_{вх.с} = \left|\frac{U_{б\text{-}э1} - U_{б\text{-}э2}}{I_{б1} - I_{б2}}\right| = \left|\frac{(-980\cdot 10^{-3}) - (-90\cdot 10^{-3})}{46\cdot 10^{-3} - 1\cdot 10^{-3}}\right| = 20 \text{ ом}.$$

2. Сопротивление постоянному току в точке A

$$R_{вх0} = -\frac{U_{б\text{-}эA}}{I_{бA}} = -\frac{-675\cdot 10^{-3}}{22{,}5\cdot 10^{-3}} = 30 \text{ ом}.$$

Знак минус в последней формуле взят в соответствии с выбранными положительными направлениями тока $I_б$ и напряжения $U_{б-э}$.

Необходимо помнить, что все расчеты, выполняемые на основании входных характеристик, отличаются невысокой точностью и служат практически только для определения порядка той или иной величины.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЯМОЙ ПЕРЕДАЧИ ПО ТОКУ

Статической характеристикой прямой передачи по току транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, называется график зависимости тока коллектора от тока базы при неизменном напряжении коллектор — эмиттер.

Снятие этой характеристики можно осуществить с помощью схемы на рис. 4. Установив потенциометром R_2 требуемую величину напряжения $U_{к-э}$ и поддерживая ее неизменной, устанавливаем с помощью переменного сопротивления R_1 ряд последовательных значений тока базы $I_б$ и записываем каждый раз величину тока коллектора. Результаты представляем в виде графика, вдоль горизонтальной оси которого откладываем величину тока базы $I_б$, а вдоль вертикальной оси — величину тока коллектора $I_к$.

Располагая семейством выходных статических характеристик, легко построить характеристику прямой передачи, не прибегая к снятию ее. Для этого восстанавливаем перпендикуляр к оси напряжений семейства выходных статических характеристик в точке, которая соответствует интересующему нас значению $U_{к-э}$. Каждая

точка пересечения этого перпендикуляра с выходной статической характеристикой дает нам величину тока базы $I_б$ и соответствующую ей величину тока коллектора $I_к$, т. е. координаты одной точки статической характеристики прямой передачи по току.

Динамической характеристикой прямой передачи по току называется та же зависимость, построенная для случая, когда в цепь коллектора включено некоторое сопротивление нагрузки $R_н$, а напряжение источника питания (батареи) равно заданной постоянной величине $U_и$.

Снимать по точкам динамические характеристики, в том числе и динамическую характеристику прямой передачи по току, можно лишь в том случае, если сопротивление нагрузки имеет одинаковую

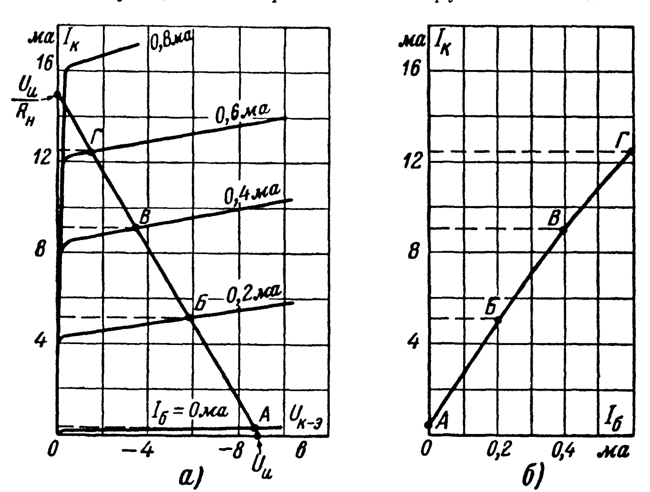


Рис. 14. Построение динамической характеристики прямой передачи транзистора по току.

величину как для переменного, так и для постоянного тока. Если же нагрузка имеет разное сопротивление для постоянного и переменного тока (например, при трансформаторной связи или в случае, когда нагрузкой служит параллельный колебательный контур), снимать динамическую характеристику по точкам нельзя, и приходится прибегать к ее построению.

Пример 7. Построить динамическую характеристику прямой передачи по току транзистора типа П13, включенного по схеме с общим эмиттером, если напряжение источника $U_и = 9$ *в*, в цепь коллектора включено сопротивление $R_н = 600$ *ом*, а семейство выходных статических характеристик транзистора показано на рис. 14,*а*.

Решение 1. Прежде всего надо построить на семействе выходных характеристик линию нагрузки. Ввиду того, что в данном случае сопротивление нагрузки одинаково как для постоянного, так и для переменного токов, техника этого построения несколько отли-

чается от изложенной выше для случая трансформаторной связи с нагрузкой.

Если предположить, что ток в цепи коллектора отсутствует ($I_к=0$), то падение напряжения на сопротивлении $R_н$ должно быть равно нулю, а напряжение $U_{к-э}$ между выводами коллектора и эмиттера будет равно напряжению батареи $U_и$. Следовательно, нагрузочная прямая каскада должна пройти через точку $U_{к-э}=-U_и$, расположенную на горизонтальной оси ($I_к=0$).

Если предположить далее, что падение напряжения между выводами коллектора и эмиттера равно нулю, то напряжение источника $U_и$ окажется полностью приложенным к сопротивлению $R_н$, и в последнем, а также и в цепи коллектора установится ток

$$I_к=\frac{U_и}{R_н}.$$

Это дает координаты еще одной точки, расположенной на вертикальной оси ($U_{к-э}=0$), через которую должна пройти нагрузочная прямая.

Через найденные на осях точки проводим прямую (линию нагрузки), как показано на рис. 14,*а*. Точки пересечения нагрузочной прямой со статическими характеристиками обозначим буквами *А*, *Б*, *В* и *Г*.

2. Строим систему координат, вдоль горизонтальной оси которой наносим в выбранном масштабе значения тока базы, а вдоль вертикальной оси — значения тока коллектора.

Переносим точки *А*, *Б*, *В* и *Г*, учитывая их кординаты, с рис. 14,*а* на рис. 14,*б*.

Например, из рис. 14,*а* следует, что току базы $I_б=0$ соответствует ток коллектора $I_к=0{,}3$ *ма* (точка *А* на рис. 14,*а*). Наносим эту точку ($I_б=0$; $I_к=0{,}3$ *ма*) на рис. 14,*б*. Аналогично поступаем со всеми остальными точками пересечения. Соединив перенесенные на рис. 14,*б* точки плавной линией, получим динамическую характеристику прямой передачи транзистора по току.

Если сопротивление нагрузки имеет для постоянной составляющей тока коллектора меньшую величину, чем для переменной составляющей (например, в цепь коллектора включен дроссель, первичная обмотка трансформатора или параллельный колебательный контур), то нагрузочную прямую строим так, как это было сделано в примере 4, а в остальном построение динамической характеристики прямой передачи по току не отличается от только что рассмотренного.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРАТНОЙ ПЕРЕДАЧИ

Статической характеристикой обратной передачи по напряжению транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, называется зависимость величины напряжения $U_{б-э}$ между выводами входных электродов транзистора от напряжения $U_{к-э}$, приложенного к выходным электродам, снятая при постоянном токе базы.

Семейство таких характеристик транзистора типа П13 показано на рис. 15,*б*. Параметром семейства является ток базы $I_б$. Из этого

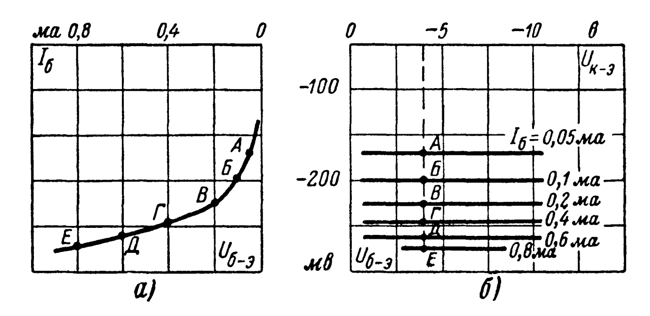


Рис. 15. Семейство статических характеристик обратной передачи по напряжению (*б*) и построенная по этому семейству входная статическая характеристика (*а*).

рисунка видно, что при неизменном токе базы напряжение $U_{б-э}$ практически не зависит от напряжения $U_{к-э}$ (характеристики идут горизонтально), но для разных значений тока базы характеристики обратной передачи существенно различаются.

Семейство характеристик на рис. 15,*б* получено путем снятия их импульсным методом. Снимать характеристики обратной передачи по точкам нельзя, так как изменение температуры коллекторного и главным образом эмиттерного перехода сильно влияет на ход характеристик.

Располагая семейством статических характеристик обратной передачи по напряжению, можно построить одну или несколько статических входных характеристик транзистора.

Пример 8. Построить статическую входную характеристику транзистора типа П13, которая соответствовала бы выходному напряжению $U_{к-э}=-4$ *в*, если семейство статических характеристик обратной передачи этого транзистора по напряжению имеет вид, показанный на рис. 15,*б*.

Решение. 1. В точке $U_{к-э}=-4$ *в* восстанавливаем перпендикуляр к оси напряжений.

Каждая точка пересечения этого перпендикуляра с одной из статических характеристик обратной передачи (точки *А*, *Б*, *В*, *Г*, *Д* и *Е* на рис. 15,*б*) дает нам значение входного тока $I_б$ и входного напряжения $U_{б-э}$ транзистора при заданном (равном — 4 *в*) напряжении $U_{к-э}$ между выходными электродами транзистора.

2. Строим схему координат (рис. 15,*а*), вдоль вертикальной оси которой будем откладывать значения напряжения между входными электродами $U_{б-э}$, а вдоль горизонтальной — значения входного тока $I_б$.

Переносим точки *А*, *Б*, *В*, *Г*, *Д*, и *Е* с семейства характеристик обратной передачи на график с новой системой координат. Например, точку *А* рис. 15,*б*, которая соответствует напряжению $U_{б-э}=-170$ *мв* и току $I_б=0{,}05$ *ма*, переносим в точку *А* на рис. 15,*а* и т. д. Соединив перенесенные точки плавной линией, получим искомую входную статическую характеристику.

ТИПОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНЗИСТОРОВ

В справочной литературе часто изображают все четыре основных семейства характеристик в виде одного общего чертежа Схема расположения семейств характеристик на общем чертеже показана на рис. 16.

В правой верхней части чертежа располагается семейство статических выходных характеристик, а слева от него — семейство

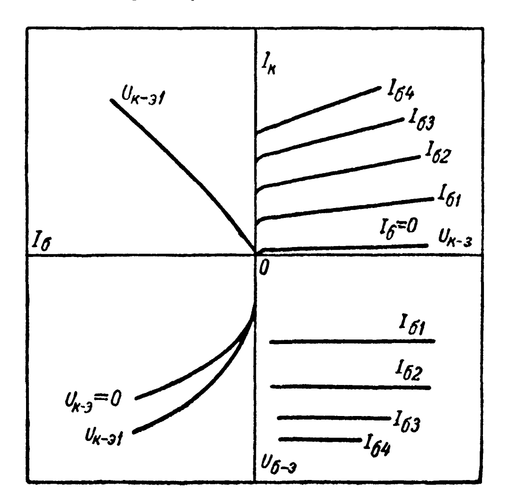


Рис 16. Схема расположения на одном чертеже четырех семейств типовых характеристик транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.

характеристик (или одна характеристика) прямой передачи по току В левой нижней части располагается семейство входных статических характеристик, а справа от него — семейство характеристик обратной передачи по напряжению.

Вдоль каждой из полуосей координат откладывается одна из четырех переменных величин: входной ток $I_б$, напряжение между входными электродами $U_{б-э}$, выходной ток $I_к$, напряжение между выходными электродами $U_{к-э}$ Каждая полуось вместе с принятым для нее масштабом является общей для двух прилегающих к ней семейств.

Достоинство такого способа изображения характеристик заключается, во-первых, в большей наглядности, универсальности и лучшем использовании площади чертежа, чем при изображении тех же характеристик в виде четырех отдельных рисунков. Ведь когда семейства характеристик изображены на общем чертеже, легче сопоставлять интересующие нас точки на отдельных характеристиках и анализировать свойства транзистора. Во-вторых, наличие

общего масштаба для каждых двух смежных семейств характеристик облегчает графическое построение одних характеристик по известным другим характеристикам, например характеристик, расположенных в левой половине чертежа, по характеристикам, расположенным в правой половине.

Хотя приводимые в справочниках характеристики и называются типовыми, это вовсе не означает, что все транзисторы одного определенного типа, например все транзисторы типа П13, обязательно должны иметь характеристики, совпадающие с приведенными в справочнике. Название «типовые» применительно к характеристикам транзистора означает, что такие характеристики имеют большинство транзисторов соответствующего типа при указанной температуре Однако у значительного количества транзисторов того же типа некоторые характеристики могут существенно отличаться от типовых.

Обнаружить различие между типовыми характеристиками и реальными характеристиками данного экземпляра транзистора можно только путем измерений.

ПЕРЕСЧЕТ ТИПОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

В настоящее время заводы-изготовители чаще всего гарантируют для каждого типа выпускаемых транзисторов минимально допустимую величину коэффициента усиления по току, например $h_{21б} \geqslant 0{,}92$ (в данном случае подразумевается коэффициент усиления транзистора, включенного по схеме с общей базой, иначе обозначаемый символом α).

Величине $\alpha = 0{,}92$ соответствует значение коэффициента усиления по току при включении по схеме с общим эмиттером

$$h_{21э} = \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \frac{0{,}92}{1 - 0{,}92} = 11{,}5.$$

Но уже при $\alpha = 0{,}95$ получим

$$\beta = \frac{0{,}95}{1 - 0{,}95} = 19,$$

а при $\alpha = 0{,}98$ величина β составляет 49.

Величины α и β характеризуют, как известно, усиление транзистора при малых переменных составляющих токов и напряжений. Но они же определяют в первом приближении и крутизну наклона характеристики прямой передачи транзистора по току (см. пример 9).

Поскольку коэффициент усиления конкретного экземпляра транзистора может отличаться в несколько раз как в одну, так и в другую стороны от некоторого типичного значения, постольку и характеристики этого экземпляра транзистора могут значительно отличаться от приведенных в справочнике типовых характеристик. Поэтому, приступая к расчету какого-либо каскада по типовым характеристикам, желательно проверить, насколько близки действительные характеристики имеющихся в наличии транзисторов к типовым.

Для этого можно рекомендовать с помощью схемы на рис. 4 снять две-три точки характеристики прямой передачи по току

и сравнить их с соответствующими точками типовой характеристики прямой передачи по току или выходных статических характеристик. Желательно, чтобы снимаемые точки лежали в пределах интересующего нас диапазона токов и напряжений между электродами. Если для снятых точек и точек типовой характеристики разница в величинах выходного тока, соответствующих одинаковому значению входного тока, не превышает $\pm 10 \div 20\%$, то расчет можно осуществлять по имеющимся типовым характеристикам. Если же разница превышает указанную величину, то следует или снять самостоятельно необходимое для расчетов семейство статических характеристик, или прибегнуть к изменению масштаба типовых характеристик, как показано в следующем примере.

Пример 9. Путем измерения установлено, что при напряжении $U_{к-э} = -5$ *в* и токе базы $I_{б1} = 10$ *ма* ток коллектора транзистора типа П201 составляет $I_{к1} = 0{,}3$ *а*, а при токе базы $I_{б2} = 40$ *ма* ток коллектора равен $I_{к2} = 1{,}26$ *а*. Можно ли при расчете каскада, в котором будет работать этот экземпляр транзистора, воспользоваться семейством типовых выходных статических характеристик, изображенных на рис. 10?

Решение. 1. Определяем относительное отклонение измеренных значений тока коллектора $I_{к1}$ и $I_{к2}$ от указанных на рис. 10 (последние будем отмечать штрихами — $I'_{к1}$ и $I'_{к2}$):

при $I_{б1} = 10$ *ма*

$$\frac{I_{к1} - I'_{к1}}{I'_{к1}} \cdot 100 = \frac{0{,}3 - 0{,}2}{0{,}2} \cdot 100 = 50\%;$$

при $I_{б2} = 40$ *ма*

$$\frac{I_{к2} - I'_{к2}}{I'_{к2}} \cdot 100 = \frac{1{,}26 - 0{,}87}{0{,}87} \cdot 100 = 45\%$$

Таким образом, у измеренного транзистора ток коллектора на 45—50% превышает соответствующие значения типовой характеристики.

2. Будем считать, что для повышения точности расчета достаточно изменить масштаб характеристик в 1,5 раза. Это можно сделать двумя способами.

При первом способе умножаем на 1,5 все числа, расположенные вдоль вертикальной оси графика (рис. 10) и обозначающие величину тока коллектора. Численные значения параметра (тока базы) оставляем неизменными.

При втором способе оставляем неизменным масштаб оси коллекторного тока и уменьшаем в 1,5 раза все указанные на графиках семейства значения параметра (тока базы).

П. А. Попов

Характеристики транзистора



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ